



自制振动样品磁强计的设计与应用*

詹文山

(中国科学院物理研究所)

一、引言

自然界中任何物质都是有磁性的。磁矩表征了物质磁性的强弱,是了解物质性能最基本的参数。测量磁矩的普通方法分为三种:1.测量样品在不均匀磁场中所受的力;2.测量样品附近的磁感应;3.间接测量磁性有关的其它性能。测力法通常称为磁天平,早已在实验室中得到应用。它的灵敏度高,能测很弱的磁性物质,但是测量的磁场必须是梯度场,因此很难观察均匀场中的磁矩,也不适用于测量磁化强度对外加磁场或晶轴方向的关系。例如单轴各向异性很强的钐钴合金对于不加外场的剩磁磁化强度也不能测量。许多间接测量磁矩的技术,例如法拉第效应的测量;霍尔效应的测量以及铁磁共振的测量,灵敏度很高,但一般局限于某类材料的特殊现象,而且首先对材料要有相当多的知识。例如法拉第效应测量只能对薄膜进行测量。感应法都是在外加磁场,线圈的位置或样品的位置变动时,在探测线圈中产生磁通的变化而感应出电压。感应法包括振动线圈技术和振动样品技术。振动线圈技术是把探测线圈的轴平行外加磁场,而且对样品是对称布置的,这种方法只好用空心螺线管或者把一般电磁铁的极头中心打孔,在安装和操作中都带来了不方便。

1959年 S. Foner 对振动样品磁强计的结构和测量技术做了详细的描述^[1]。它是利用样品在均匀磁场中振动,在检测线圈中感应出电压的方法精确测量样品磁矩的仪器。具有结构简单,精确可靠,测试方便,用途广泛等优点。据报导国外的振动样品磁强计的灵敏度可达 10^{-3} 到 10^{-6} 电磁单位。外磁场多用超导螺线管和直流强磁场,最高可达 220 千奥斯特。因此可以广泛用来研究物质的顺磁性、抗磁性、铁磁性、亚铁磁性和超导性能。例如研究高场超导性能、铁磁单晶体的高场饱和性能、各种金属和合金的磁性以及蛋白质的磁性^[2]等。

本文描述了一个我们设计和自制的、适用于测量一般磁性材料(金属,合金,铁氧体,各种磁性化合物)性能的振动样品磁强计。它是用电磁铁产生一万奥斯特

特的磁场,采用双线圈体制,用 20 赫/秒的同步马达产生振幅为 ± 1 毫米的振动,用差分放大器检测放大信号,用 X-Y 函数记录仪自动记录测试结果。仪器灵敏度为 5×10^{-3} 电磁单位,温度从 -150°C 到 $+400^\circ\text{C}$,测试样品重 1—100 毫克,测试一条 M-H 曲线仅需二分钟,一条从 -100°C 到 $+200^\circ\text{C}$ 的磁矩随温度变化的曲线也只需 40 分钟。

二、基本原理

一个具有磁性的物体在它从一个线圈附近快速离开或接近时,线圈中就会感应电压。如果这个物体在线圈附近来回振动,那么在线圈中就会产生一个与振动频率一致的交流电压。当物体的尺寸比物体和检测线圈之间距离小很多时,该物体可看成是一个偶极子。一个磁矩为 m 的偶极子在线圈附近产生的磁场为

$$H(r) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{m}{r^3} - \frac{3(m \cdot r)r}{r^5} \right).$$

如果偶极子的轴平行于外场并且垂直于线圈的轴,而振动方向平行于线圈的轴向,那么在线圈中产生的感应电压为

$$V(t) = \frac{6}{\pi} m \mu_0 \omega \cos(\omega t) dz \\ \times \sum_n dA \frac{1}{r^n} \{x(r^2 - 5z^2)\} K$$

由上式得出:(1)感应电压 $V(t)$ 与偶极子磁矩 m 成正比;(2) $V(t)$ 与振动频率 (ω) 和振幅 dz 成正比;(3) $V(t)$ 与面积匝数 $\sum_n \int_A d(A)$ 成正比(n 为线圈总匝数, A 为线圈的截面积);(4) $V(t)$ 与线圈的位置 (r) 及几何形状有关。在一个振动样品磁强计中,频率和振幅是确定的,而线圈的几何形状和位置很难准确给出,因此用测量电压的数值通过公式计算磁矩是很困难的,实际上是不可能的。但是对一个设计安装好了的振动样品磁强计,线圈的面积匝数、几何形状及位置是确定的。因此,在实际工作中采用与标准样品

* 1974年4月26日收到。

(已知磁矩的)感应的电压相比较的方法进行测量。通常标准样品采用镍球。当 $V_{\text{标}}$ 和 $V_{\text{样}}$ 分别为同一条件下测试标准镍和待测样品的电压,那么,

$$V_{\text{标}}/V_{\text{样}} = \sigma_{\text{标}}m_{\text{标}}/\sigma_{\text{样}}m_{\text{样}}$$

$m_{\text{标}}$ 和 $m_{\text{样}}$ 分别为标准镍和待测样品的质量; $\sigma_{\text{标}}$ 和 $\sigma_{\text{样}}$ 分别为标准镍和待测样品的比饱和和磁化强度。由此可得

$$\sigma_{\text{样}} = (\sigma_{\text{标}}m_{\text{标}}/m_{\text{样}})(V_{\text{样}}/V_{\text{标}})$$

为了减少样品的体积效应,标准样品应当与待测样品体积相近。在样品足够小时,体积效应可以忽略。

如果要测量某一磁场下的比磁化强度或不加外场时的剩磁磁化强度,上式的 $V_{\text{样}}$ 为在某磁场下样品感应的电压或不加外场时感应的电压。 $V_{\text{标}}$ 仍然是饱和磁场下标准样品的感应电压。

三、测试装置

如图 1 所示,整个装置大体可分成五个部分。现分别叙述如下:

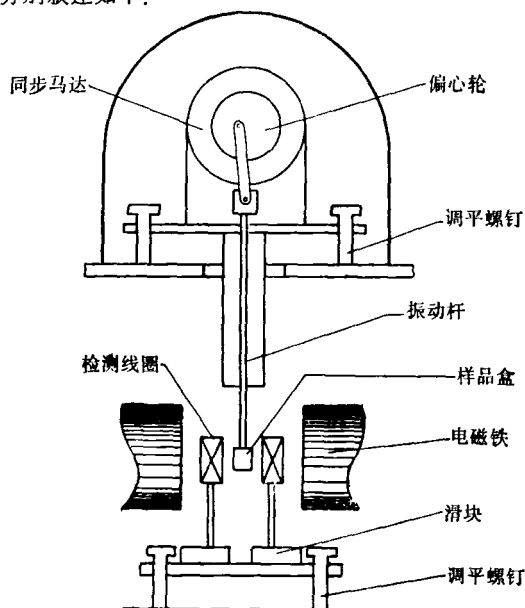


图 1 振动样品磁强计

1. 振动装置 振动磁强计要求振动频率和振幅稳定可靠。通常采用的方式有扬声器、偏心轮和压电体等三种。频率和振幅的数值要求不严格,通常频率从几周/秒到 100 周/秒,频率高,信号强,但受机械驱动机件限制和工频、电子元件噪音限制。振幅从 0.1 毫米到 2 厘米的范围。该装置采用偏心轮的方式,用每秒 20 周的同步马达带动一个惯性轮,惯性轮上用一个偏心轴带动振动杆,产生 ± 1 毫米的振动。同

步马达、振动杆是安装在一个带有刻度的转盘上,使样品能在水平面上转动。整个振动部分放在电磁铁上。

2. 检测线圈 根据线圈的布置通常分为双线圈、四线圈和八线圈体制。每一个线圈的匝数从几百匝到上万匝,也有的把检测线圈与超导线圈共用。该装置采用最为方便的双线圈体制。每个线圈用 0.2 毫米直径的漆包线缠绕在 $\phi 12 \times 4 \times 20$ 毫米的“工”字型聚四氟乙烯骨架上,共 3000 圈,直流电阻 74 欧姆。线圈安装在滑块上,便于调节线圈之间的距离。滑块安装在带有刻度的转盘上,用来调节线圈的方位角。线圈的调节装置放在电磁铁极头下面。为了消除磁场的稳定性和它与线圈系统的机械振动所引起的影响,两个线圈是串连接反的。

3. 电子测量系统 电子测量线路要求能使探测线圈中产生的微弱信号精确地成比例地放大检测,要求放大倍数足够大而且稳定。早期的振动样品磁强计采用消尽法,随着电子技术的迅速发展积分数字电路^[3,4],尤其是锁相技术在振动磁强计中得到应用,使磁强计的灵敏度得到很大的提高。

该装置采用的电子线路如图 2 所示。为了检测微伏或更小的信号,测试放大器必须精心设计,尽量降低放大器本身的噪音和提高抗干扰能力。该测试电路为 BG301 运算放大器接成的差分放大线路。选频放大器是用差分对管 5G921 组成差分放大回路,双 T 滤波器组成选频回路。放大的信号经交直流变换器输入到 X-Y 记录仪上。选放后可用示波器进行监视。该线路的电压放大倍数大于 30 分贝,噪音的电压在微伏数量级。

4. 磁场扫描装置 为了自动测试磁化强度对磁场的变化,必须使电磁铁能自动从零变到最大。该装置采用方便而可靠的机械扫描装置。它是用马达带动蜗轮、蜗杆,转动硅整流器的三相调压变压器。用按钮开关和继电器组成启动和自动停机回路。

5. 温度装置 如图 3 所示。由于电磁铁极头间隙有限,温度控制采用吹气的方法。低温用液氮可得到 -150°C 。高温用氮气或压缩空气可得到 $+400^{\circ}\text{C}$ 。温度调节是用两个调压器,一个控制放在液氮内的电热

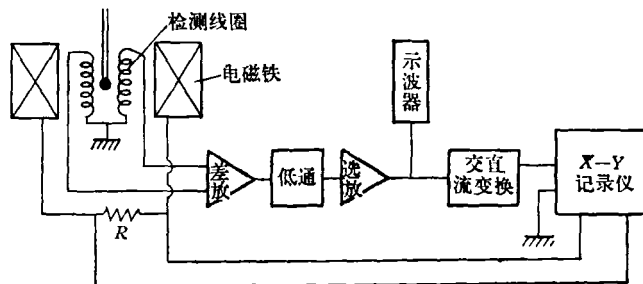


图 2 振动样品磁强计电路图

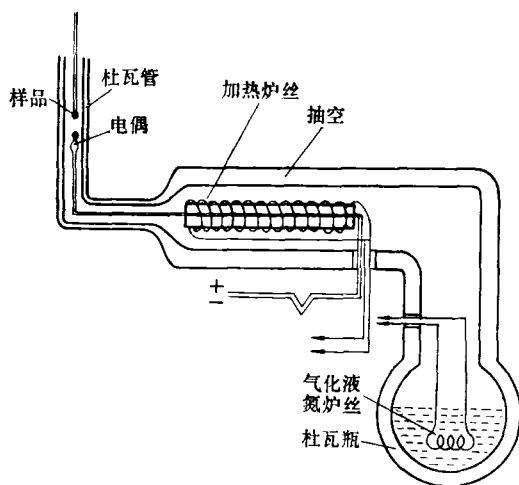


图3 振动样品磁强的温度测量装置

丝, 调节吹气量; 一个控制加热炉丝调节氮气的温度。杜瓦瓶用 $\phi 120 \times 100 \times 430$ 的玻璃杜瓦瓶。

四、定标及影响测试的因素

感应电压是否与样品磁矩成正比是振动样品磁强计定标的关键。我们分别用 2, 4.8, 10.6 和 19.05 毫克的纯镍做定标实验 (见图 4)。曲线饱和段的电压是与磁矩 m 成正比, 与第二节分析相符合。

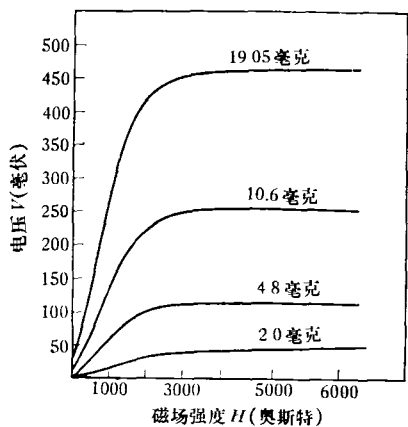


图4 镍的定标曲线

振动样品磁强计是一种灵敏度很高的仪器, 极容易受到干扰而带来测试误差。重要的影响有以下几方面:

1. 放大器本身的噪音和放大倍数的不稳定。
2. 周围环境的微弱振动。例如门窗的碰撞和人的走动。
3. 周围电器的影响。例如, 电磁铁的直流电源, 其它大功率设备和电器的开断等。

4. 仪器接地不良或不合理, 使地线回路中感应进去交变工频干扰信号。

5. 仪器本身振动部分的影响。

6. 检测线圈与样品相对位置之间的影响。详细分析见文献[1,5]。

五、应用实例

1. 磁化强度 M 与磁场 H 的关系曲线和它对温度的关系

图 5 表示了 $MnZn-2000$ 和 $NiZn + Co_2Y$ 的 $M-H$ 曲线, 由饱和段可得到饱和磁化强度, 分别为 $\sigma_s = 80.6$ 和 $\sigma_s = 74.3$ 。图 6 表示了金属轧的 $M-H$ 曲线与温度的关系。当我们将规则形状 (例如球形) 的多晶样品进行测试时, 由于形状规则, 可计算退磁场, 对于球形多晶样品, 其退磁场 $H_{退} = \frac{4\pi}{3} M$, 因而可得

$M-H_{有效}$ 曲线。利用趋近饱和定律可计算各向异性常

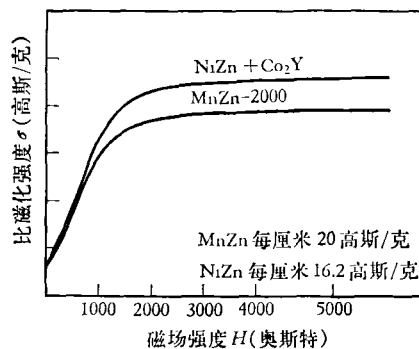


图5 $MnZn-2000$ 和 $NiZn + Co_2Y$ 铁氧体的比磁化强度与磁场的关系

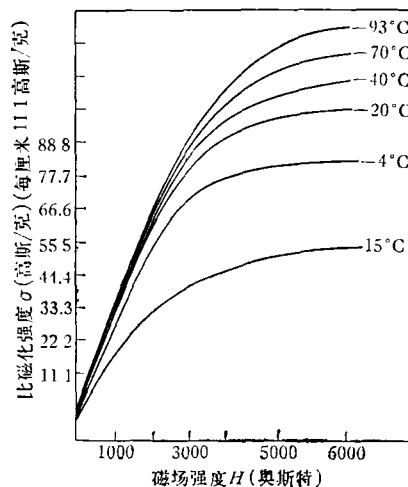


图6 轧的磁化曲线与温度的关系

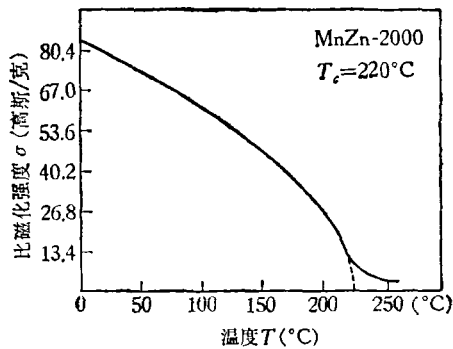


图7 MnZn-2000 铁氧体的磁化强度与温度的关系

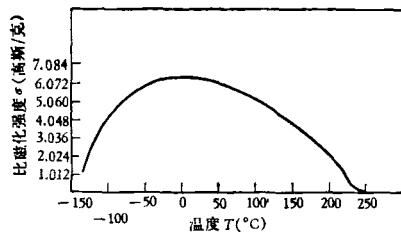


图8 微波铁氧体的磁化强度与温度的关系

数 K 值。在不同温度下进行测试可得 $K-T$ 曲线。

2. 测量磁化强度与温度的关系。图7表示了 MnZn-2000 材料的 $M-T$ 曲线, 并给出了铁磁居里点 $T_c = 220^\circ\text{C}$ 。图8给出了有抵消点的微波铁氧体的 $M-T$ 曲线。

3. 测量永磁材料的退磁曲线。图9给出了钕铁氧体的退磁曲线, 得到材料的 B_r , B_r , I_r , H_c , BH_c 和 $(B \cdot H)_{\text{最大}}$ 。开路测量永磁材料的退磁曲线必须要用能够计算退磁因子的规则形状。例如, 球形的退磁因子为 $4\pi/3$ 。一般球形样品可以用气磨的方法制备。

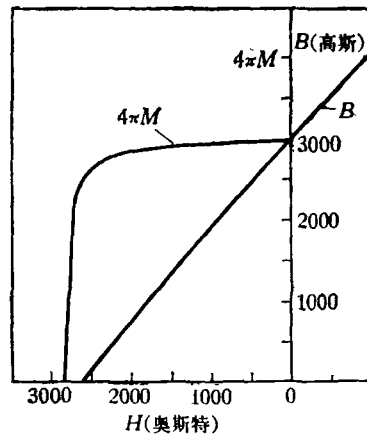


图9 钕铁氧体的退磁曲线
[磁能级 $(BH)_{\text{max}} \approx 2.5 \times 10^6$ 高斯·奥斯特]

4. 该装置建成后, 为冶金工业鉴定了不锈钢的磁性, 在 7000 奥斯特磁场下磁化率 $\chi < 10^{-4}$ 。同时还为选矿场鉴定选矿用的四氧化三铁的剩磁强度和矫顽力。

参 考 文 献

- [1] Foner, S., *Rev. Sci. Instrum.*, **30** (1959), 548.
- [2] Alfred, G., Redfield, and Charles Moleski, *Rev. Sci. Instrum.*, **43** (1972), 760.
- [3] Strnat, K. and Bartimay, L., *J. A. P.*, **38-3** (1967), 1305.
- [4] Foner, S. and Menirfjr, E. J., *Rev. Sci. Instrum.*, **39** (1968), 171.
- [5] Bowden, G. J., *Journal of Physics Scientifico Instruments*, **5** (1972), 1115.

(上接第 126 页)

t_1 、 \bar{x}_1 、 \bar{u}_1 的理解是不正确的。这几个参量既不是相对什么伪静止系而言, 也不是代表两个超光速粒子相对于所谓静止系 $x_0 y_0 z_0$ 的运动学量, 它们分别只是同一个超光速粒子在两个不同的惯性系中的时间、坐标和速度。因此作者把(4.13)式直接看成是两个超光速粒子之间的相对速度公式, 是错误的, 因为 v 根本就不是“ T_1 和 T_2 之间的相对速度”。

«映射»一文对亚光速粒子的讨论显然也似乎得到了狭义相对论的已知结果, 不过作者没有正确理解有些结果的含义。

参 考 文 献

- [1] Feinberg, G., *Phys. Rev.*, **159** (1967), 1089.
- [2] Antippa, A. F., *Phys. Rev.*, **4D** (1971), 2198.
- [3] Recami, E., & Mignani, R., *La Riv. Nuo. Cim.*, **4** (1974), 209.
- [4] Clay, R. W., & Crouch, P. C., *Nature*, **248** (1974), 28.
- [5] Mariwalla, K. H., *Am. J. Phys.*, **37** (1969), 1281.